氏　　　名	酒　井　史　敏
生 年 月 日	
本　　　籍	栃木県
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第401号
学位授与の日付	平成13年3月22日
学位授与の要件	課程博士（学位規則第4条第1項）
学位授与の題目	トルク飽和を考慮したサーボモータの動特性解析とその応用
論文審査委員(主査)	神谷　好承（工学部・教授）
論文審査委員(副査)	藤原　直史（自然科学研究科・教授）藤田　政之（工学部・教授） 宮崎　　猛（工学部・助教授）関　　啓明（自然科学研究科・講師）

学位論文要旨

ABSTRACT

Servo motors are widely used as actuators to drive many automatic machines. A manufactured servo driver (amplifier) is usually selected to drive and control each motor at high performance. The servo driver has not only a role of amplifying a control signal. Aiming at a high performance of the motion control such as decreasing the steady state error against the disturbances, compensation circuits should be involved in the servo driver. Motion of the motor driven by such servo drivers has very complicated dynamic characteristics in fact. These characteristics cannot be explained by considering the driver as a linear system. In this study, it is tried to make clear about inner composition of the servo driver through measuring the dynamic characteristics of the servo motor which is driven by the manufactured servo driver. And, it is tried to express mathematically transfer function of the velocity control system.

1. 緒　言

産業用メカトロニクス機器の中でもその代表とされている数値制御工作機械，産業用ロボットなどの機械に用いられているサーボ系においては，かなり以前からサーボ系の特性が位置フィードバックゲインによって表現されてきている．制御系の設計および解析においては系を1次または2次の低次のモデルに近似することはごく自然なことではある．しかし，サーボ系に関し，その内部構成がどのような条件を満たしていればこのように考えてよく，また，その低次モデルを使用してよい条件はどのようなものであるかなどについてはほとんど明確にされていない．現状のサーボ系の捉え方においては，メカニズムは剛体としてモータ軸に結合されているとみなされている．このような前提条件下でメカニズムを駆動するためのサーボモータの選定もおこなわれている．サーボ系の制御パラメータの調整もこのことを踏まえたものである．このような前提条件に立った低次モデルでの近似の条件はかなり明確に示されているが，実際にはこの前提条件を満たすことは種々の制約より困難となってきており，さらにメカトロニクス機器の動作の高速，高精度化の要求は常に生じており，近年ますます高い値が目標とされてきている．これらに対応する制御方策を考えていくためには，制御系をより正確にモデル化することが要求されてきている．しかし，サーボアンプを用いた制御系はブラックボックスとして詳しいデータはあまり公開されないのが一般的である．さらに市販のサーボアンプには単なる制御信号の増幅だけでなく外乱に対して定常偏差を小さくするといったモータの制御性能を高める目的からいくつかの補償要素を含ませてあり，さらにサーボモータやサーボアンプ

の回路素子を保護するための機能を持たせてある.そのために市販のサーボアンプにより駆動されるサーボモータの動特性を測定してみるとそれは決して単純なものではなく,サーボモータの運動が線形系であるとはとても考えられない動特性を示すことが多く精度の良いモデルを簡単に求めることは困難である.そこでサーボアンプ内でどのような制御が施されているのかを詳細に検討し,サーボアンプにより駆動されるサーボモータのもつ複雑な動特性の根拠を明らかにすることは重要であり,各構成要素の目的や役割を詳細に考察し,実際の使用にあたり考慮すべき点についても明らかにすることが必要と考えられる.

2. DCサーボモータの動特性に関する考察

2.1 サーボアンプを用いた速度制御系

本研究で使用したサーボアンプの取扱説明書に記載されている回路図をもとに図2.1の速度制御系を考える(制御系内の既知なパラメータは表2.1を参照).この制御系には速度フィードバックループの内側に,電機子電流を検出し,これをフィードバックする電流制御のためのループが加えられている.また,速度アンプ$G_v(s)$の出力がモータへの電流指令となることから,この電流指令を飽和要素によって制限することでモータに流れる電機子電流の最大値を制限している.この飽和要素はモータを過電流から保護するために設けられているものであり,

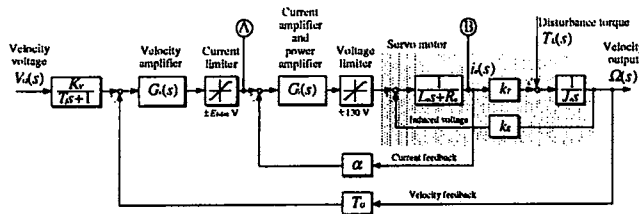



Fig.2.1 Block diagram of DC servo motor velocity control system

Table 3.1 Parameters of velocity control system

Parameter		Value	Unit
Moment of inertia	J_a	5.59×10⁻⁵	kg·m²
Armature resistance	R_a	8.7	Ω
Armature inductance	L_a	0.0055	H
Voltage constant	k_E	0.187	V/(rad/s)
Torque constant	k_T	0.188	Nm/A
Tachometer generator coefficient	T_G	0.0668	V/(rad/s)
Gain of reference filter	K_V	2.33	-
Time constant of reference filter	T_f	0.0032	s

必須な要素である.また,速度アンプ,電流アンプは共にPI制御器で構成されている.速度指令電圧$V_\Omega(s)$にはフィルタが付加され,スパイク状の入力を取り除いている.

図2.1において電流アンプ$G_i(s)$,速度アンプ$G_v(s)$が,式(2-1)に示すようにそれぞれPI制御器で構成されているとし,

$$G_i(s)=\left(\frac{K_A}{s}+K_B\right)K_P,\quad G_v(s)=\frac{K_C}{s}+K_D \tag{2-1}$$

K_P:パワーアンプのゲイン

飽和要素の影響を受けない線形領域での応答を考えると目標値$V_\Omega(s)$に対するタコジェネ出力電圧$T_G\Omega(s)$は,式(2-2)のように与えられ,

$$\begin{aligned} T_G\Omega(s)&=\frac{b_2s^2+b_1s+b_0}{a_4s^4+a_3s^3+a_2s^2+a_1s+a_0}\frac{K_V}{T_fs+1}V_\Omega(s)\\ &-\frac{c_3s^3+c_2s^2+c_1s}{a_4s^4+a_3s^3+a_2s^2+a_1s+a_0}T_L(s) \end{aligned} \tag{2-2}$$

$a_4=J_aL_a$, $a_3=J_a(R_a+\alpha K_BK_P)$,

$a_2=\alpha J_aK_AK_P+k_TT_GK_BK_PK_D+k_Tk_E$,

$a_1=k_TT_G(K_AK_PK_D+K_BK_PK_C)$, $a_0=k_TT_GK_AK_PK_C$

$b_2=k_TT_GK_BK_PK_D$, $b_1=k_TT_G(K_AK_PK_D+K_BK_PK_C)$,

$b_0=k_TT_GK_AK_PK_C$

$c_3=L_aT_G$, $c_2=T_G(R_a+\alpha K_BK_P)$, $c_1=\alpha T_GK_AK_P$

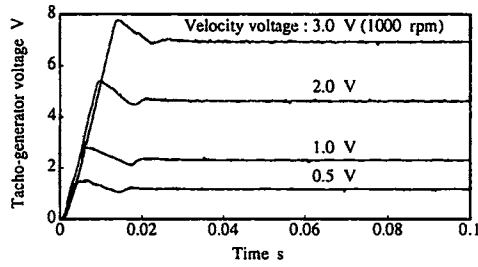



Fig.2.2 Step responses of velocity control system

式(2-2)にはその分母，分子に未知なパラメータ（α, K_AK_P, K_BK_P, K_C, K_D）を含む．これに対して実測によって得られたモータ動特性の一例として，速度指令電圧としてステップ入力を与えたときのタコジェネ出力電圧を図2.2に，また正弦波状入力電圧においてその周波数と振幅を変化させたときの周波数特性を図2.3に示す．図2.2のステップ応答をみると，どの速度指令電圧に対してもほぼ一定の角加速度で立ち上がっている．また，図2.3の周波数特性をみると，速度指令電圧が大きくなるにつれて折れ点周波数が低くなっている．こうした現象は飽和要素によって電流指令を制限することでモータに流れる電機子電流の最大値を制限していることによるものである．

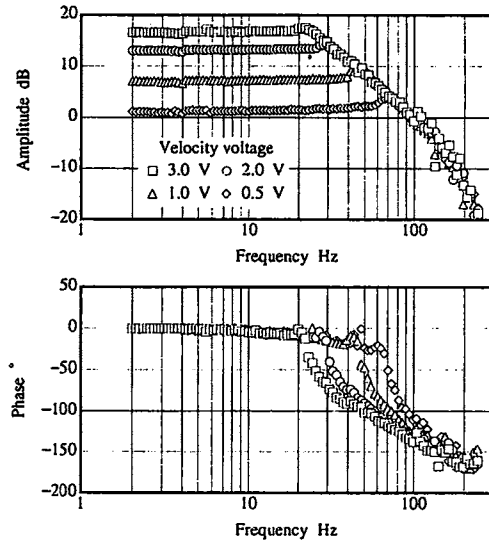



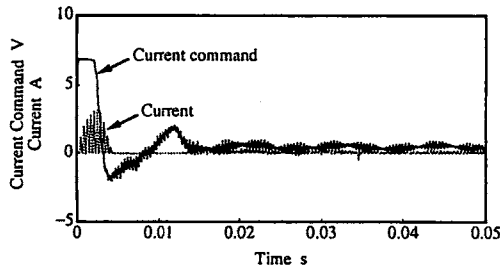
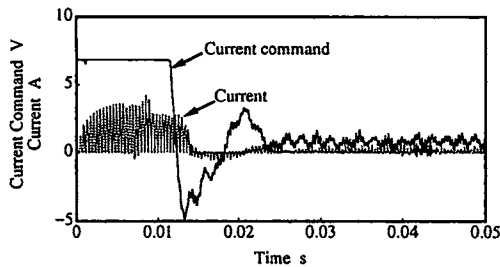
Fig.2.3 Frequency characteristics of velocity control system

(a) Velocity voltage : 0.5 V (167 rpm)

(b) Velocity voltage : 3.0 V (1000 rpm)

Fig.2.4 Current command and its current at step response

2.2 サーボアンプの構成要素の詳細

2.2.1 電流フィードバック係数 α

速度指令としてステップ入力を与え，そのときに検出された電流指令とそのときの電機子電流の様子を図2.4に示す．この結果から，本研究で使用したサーボアンプの場合，電流指令の最大値が ±7 V に制限されていることが，またそのときに流れる電機子電流がおよそ3.5 A に収束していることがわかる．これより電流フィードバック係数は $\alpha = 2$ V/A であることがわかる．

2.2.2 電流アンプ $G_i(s)$

図2.1に示す速度制御系の一部分であるサーボモータと電流ループのみを考える（図2.5参照）．ここで電流アンプを式(2-1)のPI制御器とすれば電機子電流 $i_a(s)$ は，

$$i_a(s) = \frac{\frac{K_BK_P}{L_a}s + \frac{K_AK_P}{L_a}}{s^2 + 2\zeta_i\omega_{ni}s + \omega_{ni}^2}E_i(s) + \frac{\frac{k_E}{J_aL_a}}{s^2 + 2\zeta_i\omega_{ni}s + \omega_{ni}^2}T_L(s) \qquad \text{(2-3)}$$

$$\omega_{ni}^2 = \frac{\alpha J_aK_AK_P + k_Tk_E}{J_aL_a}, \quad \zeta_i = \frac{R_a + \alpha K_BK_P}{2L_a\omega_{ni}} \qquad \text{(2-4)}$$

のように与えられる．図2.6の電機子電流波形から時定数はおよそ0.005 sであり，またオーバーシュートは生じていないので式(2-4)における固有角周波数 ω_{ni} を 1256 rad/s (1/0.005 = 200

Hz)，減衰係数ζ_iを 1 とすることができる．このとき電流アンプのPIゲインが$K_A K_P = 4023.8$, $K_B K_P = 2.6$のように求まる．

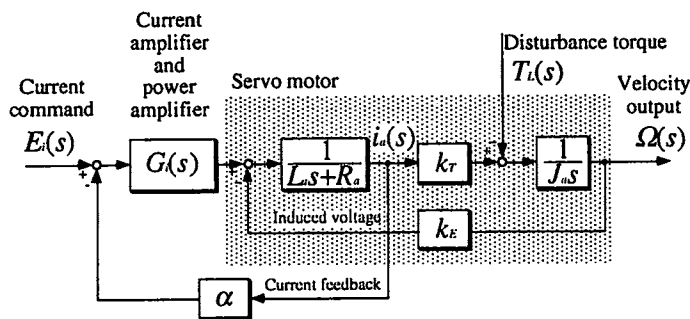



Fig.2.5 Servo motor and current roop

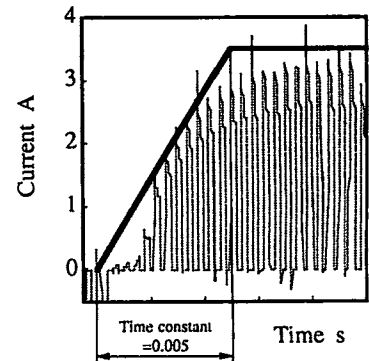



Fig.2.6 Time constant of current roop

2.2.3 速度アンプ $G_v(s)$

速度ループに比べ，電流ループの応答が十分速いために電流ループの特性をほぼ定数とみなすことができる．さらに速度指令電圧に付加されているフィルタも速度ループのもつ時定数よりも十分小さいため定数とみなす．このとき，図2.1の速度制御系は図2.7のように簡略化して扱うことができる．飽和要素の影響を受けない線形領域での応答を考えるとタコジェネ出力電圧$T_G\Omega(s)$は，

$$T_G\Omega(s) = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} K_V V_\Omega(s) - \frac{\frac{T_G}{J_a}s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} T_L(s) \tag{2-5}$$

$$\omega_n^2 = \frac{K_C k_T T_G}{\alpha J_a},\quad \zeta = \frac{K_D k_T T_G}{2\alpha J_a \omega_n} \tag{2-6}$$

として与えられる．この式から未知パラメータである速度アンプのPIゲインK_C, K_Dを求めたいところであるが，前述のように速度制御系に微少な速度指令電圧を加えたとしても，出力速度に飽和要素の影響が現れてしまい速度アンプゲインを求めることができない．また，仮に線形領域の特性が測定でき，折れ点周波数がわかったとしても，式(2-5)にみられるように速度指令電圧に対する伝達関数の零点に速度アンプゲインの値が含まれており簡単には速度アンプゲインを求めることができない．

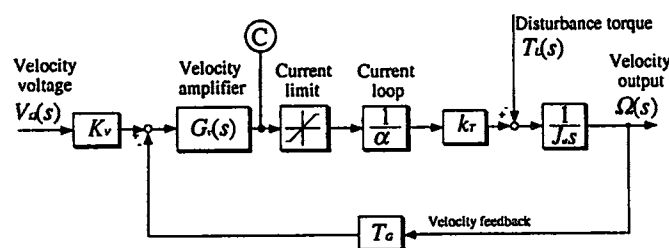



Fig.2.7 Simplified velocity control system

2.3 実験による速度アンプゲインの推定

前項までの議論では速度アンプゲインの値を特定することができない．これに対して，式(2-5)の外乱トルク$T_L(s)$に対する伝達関数に注目すると零点は近似的に原点のみであるため，外乱特性を測定することで速度アンプゲインを求められることがわかる．

外乱入力に対するモータ軸の速度変動を簡単に測定するために，板ばねとフライホイールからなる振動負荷をある回転数で回転させておき，モータを急停止させることにより負荷を振動させモータ軸に働く反力を外乱トルクとして与える方法を用いる．あらかじめ既知な慣性モーメントを持つ負荷系の自由振動を測定しておき，板ばねのばね定数を求めておくことでモータ軸位置と負荷軸位置の差，すなわち板ばねのたわみ量からモータ軸に加わる外乱トルクの大きさを求めることとする．外乱トルク$T_L(s)$を入力としモータ軸変位$\Theta(s)$を出力とする系の伝達

関数は，

$$\frac{\Theta(s)}{T_L(s)}=\frac{\frac{1}{J_a}}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n{}^2} \tag{2-7}$$

$$\omega_n{}^2=\frac{K_C k_T T_G}{\alpha J_a},\quad \zeta=\frac{K_D k_T T_G}{2\alpha J_a \omega_n} \tag{2-8}$$

となり，式(2-7)のゲインは

$$\left|\frac{\Theta(j\omega)}{T_L(j\omega)}\right|=\frac{\frac{1}{J_a\omega_n{}^2}}{\sqrt{\left(1-\frac{\omega^2}{\omega_n{}^2}\right)+\left(2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \tag{2-9}$$

のように表せるため，速度制御系にある減衰係数ζを仮定し，測定により求められるゲインと外乱トルクの周波数ωを代入すれば速度制御系の固有周波数ω_nがわかり，結果的には式(2-8)から速度アンプのゲインを求めることができる．実験により速度制御系の固有周波数はおよそ60 Hz程度であることがわかり，$K_C=1263.9$, $K_D=6.71$と推定される．

2.4 考 察

電流指令には飽和要素が設けてあるため電流指令が飽和した状態におけるモータ運動の動特性は非線形になる．これより，市販のサーボアンプを用いたモータの速度制御系を線形系として扱うことのできる範囲の速度指令電圧レベルとその周波数，およびモータ軸の慣性モーメント（$J_a\times n$）との間の関係を考察する．

速度アンプが式(2-1)に示すようにPI制御器で構成されているとすると速度アンプの出力である図2.7中のC点の電圧値$V_C(s)$と速度指令電圧$V_\Omega(s)$との関係は

$$\frac{V_C(s)}{V_\Omega(s)}=\frac{K_V s(K_D s+K_C)}{s^2+\frac{k_T K_D T_G}{\alpha n J_a}s+\frac{k_T K_C T_G}{\alpha n J_a}} \tag{2-10}$$

のように与えられ，前項までに求めたパラメータを用いることで

$$\frac{V_C(s)}{V_\Omega(s)}=0.02n\frac{s\left(\frac{1}{313.5}s+1\right)}{\frac{n}{628^2}s^2+\frac{1}{314}s+1}\cong 0.02ns \tag{2-11}$$

のように与えられる．また，2.2.1節より$|v_C(t)|_{\max}=7$ Vであるため，速度指令電圧レベルをv_Ω Vとすれば，飽和に達する周波数fは近似的に

$$2\pi f=\frac{7}{0.02nv_\Omega} \tag{2-12}$$

のようになり，飽和限界の周波数fが速度指令電圧レベルv_Ω Vとモータ軸の慣性モーメント（$J_a\times n$）の関数として与えられる．式(2-12)より求めた一例を表2.2に示す．また，式(2-12)をみるとモータ軸の慣性モーメントあるいは入力電圧のレベルが2倍になれば飽和限界の周波数はそれぞれ半分になることがわかり，図2.8に示すように線形系として扱うことのできる領域は実際には非常に狭いことがわかる．

Table 2.2 Saturation frequency

Velocity command rad/s (rpm)	17.5 (1000)	34.9 (666.7)	69.8 (333.3)	104.7 (166.7)
Saturation frequency rad/s (Hz)	116.7 (18.6)	175.0 (27.9)	350.0 (55.7)	700.0 (111.4)

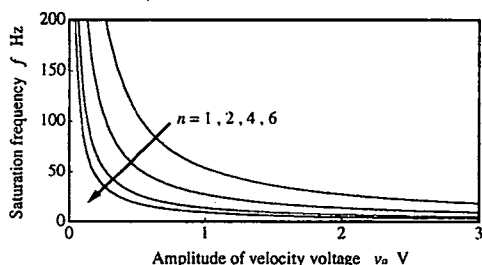



Fig.2.8 Relationship between saturation frequency, amplitude of velocity voltage, and moment of inertia

3. 結　言

本研究では，一般にブラックボックスとして詳しいデータはあまり公開されることのないサーボアンプを用いた速度制御系の内部でどのような制御が施されているのかを詳細に検討し，速度制御系の伝達関数を定量的に表現することを試みた．そして，サーボアンプにより駆動されるサーボモータのもつ複雑な非線形動特性の根拠を明らかにし，各構成要素の目的や役割を詳細に考察し，実際の使用にあたり考慮すべき点についても明らかにすることができた．

学位論文審査結果の要旨

平成13年1月23日に第1回学位論文審査委員会を開催し，提出された学位論文及び関係資料に基づき検討した。同年1月30日の口頭発表後に開催した第2回学位論文審査委員会において協議の結果，以下のように判定した。

本論文は，まず市販のDCサーボモータ駆動用のサーボアンプに含まれている速度及び電流アンプの各ゲインがモータ動特性に及ぼす影響について詳細に検討し，さらにサーボモータの動特性と回路内の電圧値を実測することによりサーボアンプの内部構成の詳細を明らかにし，市販のサーボアンプにより駆動されるサーボモータの伝達関数を定量的に表現することを試みている。そして，位置制御系を構成したときにサーボアンプに含まれる飽和要素の影響で発生するオーバシュートの発生とその対策について議論をおこない，位置決め精度を低下させない新たな対策としてモータの最大速度を制限するオーバシュート対策を提案している。また，剛性の不足する機構に対する位置決め制御への応用において，セミクローズド制御とフルクローズド制御を融合し安定かつ高い位置決め制度を得る手法を提案し，負荷軸に固体摩擦を作用させた場合と，モータ軸と負荷軸との間に非線形な伝達特性を持たせた場合の実験より提案する制御手法の有効性を確認している。

このように本研究は学術的な解析をベースにして実用性の高いサーボモータ動特性解析を提案しており，きわめて有益な知見を与えるものであり，本論文は博士（工学）に値するものと判定する。